



## **Aplicação do Método de Hirosawa Adaptado à Realidade Brasileira em uma Estrutura Modelo**

*Application of the Hirosawa Method Adapted to Brazilian Reality on a Model Structure*

Paulo de Souza Tavares Miranda(1); Tereza Denyse Pereira de Araújo(2)

(1) *Mestre em Estruturas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil – Universidade Federal do Ceará*

(2) *Professora Doutora, Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil - Universidade Federal do Ceará*

*Campus Universitário do Pici, Bloco 710 - Fortaleza - Ceará - Brasil - CEP: 60455-760*

### **Resumo**

Embora seja pequena a probabilidade de ocorrência de terremotos de elevadas magnitudes no Brasil, na elaboração de projetos de estruturas é obrigatória a consideração das ações sísmicas através da aplicação da NBR 15421:2006 - Projeto de estruturas resistentes a sismos. Esta norma tem como objetivo diminuir os danos causados pelos terremotos nas estruturas projetadas a partir da data de sua publicação. Como a grande maioria dos edifícios existentes no Brasil foi construída sem levar em consideração as recomendações desta norma, faz-se necessária a aplicação de métodos de avaliação da vulnerabilidade sísmica nestas estruturas. Dentre os métodos de avaliação da vulnerabilidade sísmica existentes, destaca-se o método de Hirosawa, também conhecido como método japonês. Neste trabalho o método de Hirosawa adaptado à realidade predial brasileira é aplicado em uma estrutura modelo. Esta estrutura é composta por três pavimentos, possui irregularidade estrutural em planta e representa uma edificação de uso essencial. A avaliação da estrutura leva em consideração as diferentes acelerações sísmicas brasileiras e os diferentes tipos de solos abordados na NBR 15421:2006. Em algumas situações, a estrutura modelo é sísmicamente vulnerável. A constatação de vulnerabilidade pelo método aplicado indica a necessidade de realização de uma avaliação mais complexa e detalhada da estrutura.

*Palavra-Chave: Vulnerabilidade, Hirosawa, Sismos*

### **Abstract**

Although small the probability of occurrence of high magnitudes earthquakes in Brazil, in the process of designing structures is mandatory consideration of seismic actions by applying the NBR 15421:2006 - Design of seismic resistant structures. This code aims to reduce the damage caused by earthquakes on structures designed from its publication date on. As the great majority of existing buildings in Brazil was built without taking into consideration these recommendations code, it is necessary to apply methods for assessing seismic vulnerability of these structures. Among the existing seismic vulnerability assessment methods, the Hirosawa method, also known as Japanese method is highlighted. In this work the Hirosawa method adapted to Brazilian reality is applied to a model structure. This three-story structure with horizontal structural irregularity represents an essential use building. The evaluation of the structure takes into account the different Brazilian seismic accelerations and different soil types covered in NBR 15421:2006. In some situations, the model structure is seismically vulnerable. The finding indicates the need for working out a more detailed and complex assessment of the structure.

*Keywords: Vulnerability, Hirosawa, Earthquakes*



## 1 Introdução

Objetivando reduzir as consequências desastrosas da ocorrência de grandes terremotos, engenheiros e pesquisadores de todo o mundo buscam, através da aplicação de procedimentos de projeto e métodos construtivos, dimensionar estruturas capazes de responder de forma segura as solicitações impostas pelas ações sísmicas. O conjunto de ações concentra-se em duas frentes bem definidas: a aplicação em novas edificações de técnicas antissísmicas definidas em normas para projetos de estruturas resistentes a sismos e a verificação da vulnerabilidade sísmica de estruturas existentes através da aplicação de métodos de avaliação.

Mesmo sendo o Brasil um país de considerável estabilidade sísmica devido à sua localização sobre a placa tectônica sul-americana, ações antissísmicas vêm sendo desenvolvidas, implantadas e exigidas nestes últimos anos.

Do ponto de vista da construção de novas edificações, é obrigatória, desde 2006, a aplicação da NBR 15421 (ABNT, 2006) que estabelece os requisitos exigíveis para a verificação da segurança das estruturas usuais da construção civil relativamente às ações de sismos.

Com relação à verificação da segurança de edificações existentes, alguns trabalhos vêm sendo desenvolvidos com o objetivo de encontrar um método de avaliação de vulnerabilidade de baixo custo e fácil aplicação compatível com a baixa sismicidade brasileira.

Vários são os métodos de avaliação de vulnerabilidade sísmica utilizados no mundo. Dentre eles podem ser citados os trabalhos de LANTADA *et al.* (2004), BERNARDINI (2000), ROSSETO E EINASHAI (2003), HIROSAWA (1992) e CALVI (1999). Estes métodos são classificados em três grupos: os qualitativos, os quantitativos e os experimentais. Os métodos qualitativos são indicados para uma avaliação inicial de um conjunto de estruturas, enquanto que os métodos quantitativos e experimentais são indicados para situações e edificações específicas, possuindo como vantagem a indicação do comportamento da estrutura, em termos de evolução de danos, quando submetida a um abalo sísmico.

No Brasil, um método qualitativo de avaliação da vulnerabilidade sísmica de estruturas de concreto armado foi introduzido no meio técnico (MIRANDA, 2010; MIRANDA E ARAÚJO, 2011) e sua aplicação é de grande importância pelo menos em edificações de uso essencial, como hospitais e instalações de Corpo de Bombeiros.

## 2 O método de Hirosawa

Dentre os métodos de avaliação da vulnerabilidade sísmica aplicados em escala mundial na avaliação de edificações de concreto, merece destaque o método proposto por HIROSAWA (1992), também conhecido como método japonês.

O método de Hirosawa possui três níveis de avaliação, sendo o primeiro de ordem qualitativa e os demais de ordem quantitativa. A base do método é a comparação entre a ação das forças sísmicas horizontais e a resistência ao cisalhamento dos elementos estruturais através da comparação direta do índice de solicitação sísmica,  $I_{s0}$ , e o índice de desempenho sísmico,  $I_s$ .



A resposta obtida da comparação destes índices leva a duas situações:

1.  $I_s \geq I_{s0}$ , a edificação tem segurança frente ao evento sísmico idealizado e pode continuar a ser usada sem a necessidade de reforço sísmico;
2.  $I_s < I_{s0}$ , a edificação tem um comportamento incerto frente ao evento sísmico idealizado.

O índice de desempenho sísmico,  $I_s$ , depende do subíndice de desempenho sísmico básico estrutural,  $E_0$  (encontrado a partir dos índices de resistência,  $C$ , e ductilidade,  $F$ , da estrutura), do subíndice de configuração estrutural,  $S_D$ , e do subíndice de deterioração estrutural,  $T_D$ .

$$I_s = E_0 \cdot S_D \cdot T_D \quad (\text{Equação 1})$$

Já o índice de solicitação sísmica,  $I_{s0}$ , depende do subíndice de solicitação sísmica básica,  $E_s$ , do subíndice de sismicidade,  $Z$ , do subíndice topográfico e geotécnico,  $G$ , e do subíndice de importância da edificação,  $U$ .

$$I_{s0} = E_s \cdot Z \cdot G \cdot U \quad (\text{Equação 2})$$

MIRANDA (2010) usou os parâmetros da NBR 15421 (ABNT, 2006) e as características construtivas adotadas nas estruturas de concreto armado no Brasil e adaptou o primeiro nível de avaliação do método de Hirosawa, aplicável a edifícios de até oito pavimentos, à realidade predial brasileira.

### 3 A Estrutura Modelo

A Estrutura Modelo possui uma área de 1.363,98 m<sup>2</sup> distribuída em três pavimentos, cada um com 454,66 m<sup>2</sup>. O edifício possui irregularidade em planta devido à forma em “L” do pavimento-tipo.

A resistência do concreto à compressão adotada é de 20 MPa. Sobre todas as vigas são previstos painéis de alvenaria de vedação. Os pesos específicos adotados para o concreto armado e alvenarias são 25,0 kN/m<sup>3</sup> e 13,0 kN/m<sup>3</sup>, respectivamente. Uma carga de 1,0 kN/m<sup>2</sup> é considerada em cada pavimento e representa as cargas de revestimento nas lajes de piso, e coberta nas lajes de forro.

A altura entre pavimentos é de 2,80 m e os vãos livres de 4,00 m. As lajes são em concreto armado com 10 cm de espessura e as vigas de seção (15x40) cm<sup>2</sup>. Os pilares possuem seção transversal (20x30) cm<sup>2</sup>.

O pórtico representativo e a planta de fôrma do pavimento +2,80 deste modelo estão mostrados, respectivamente, na Figura 1 e Figura 2.

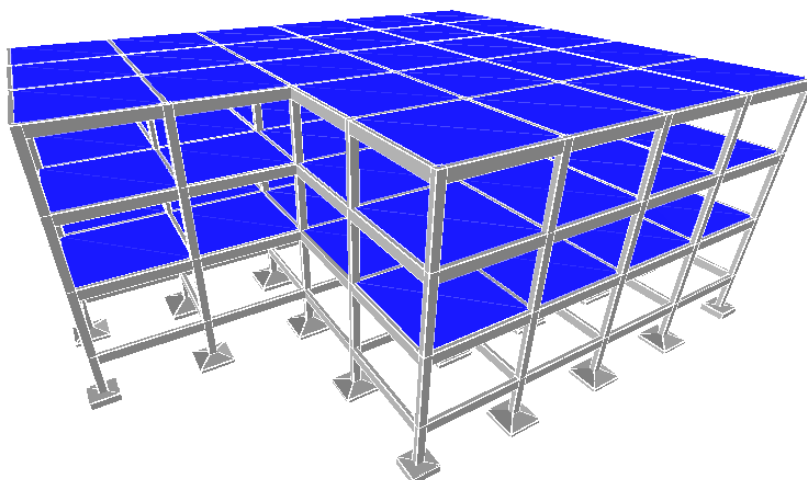
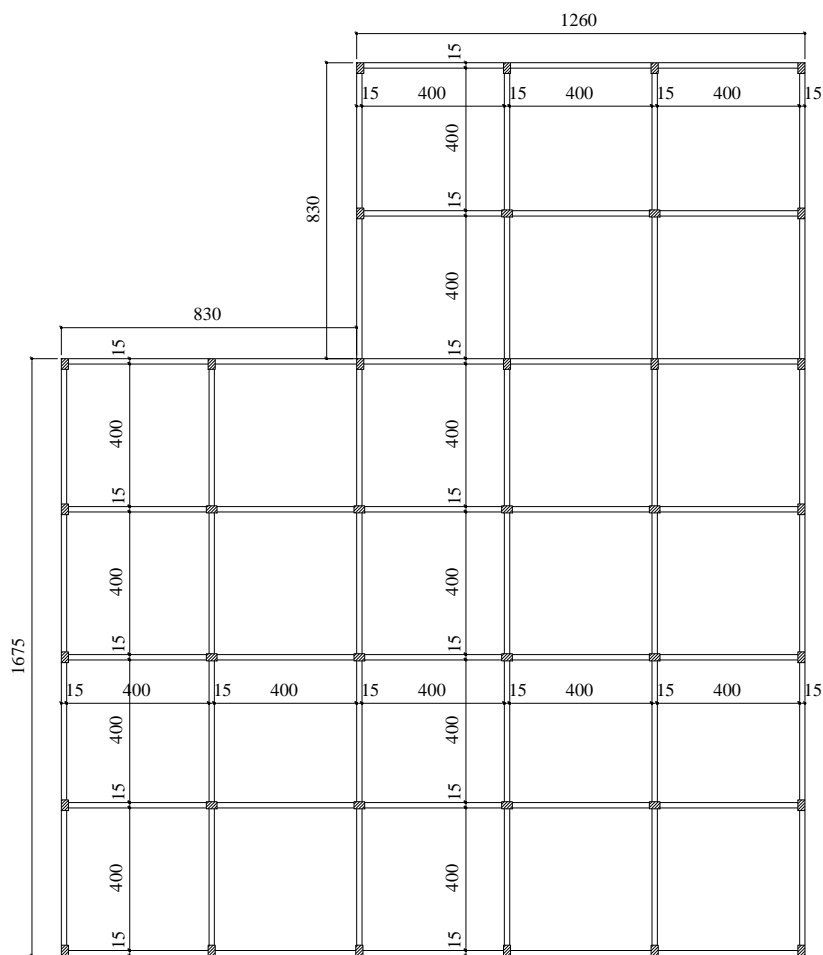


Figura 1 - Pórtico da Estrutura Modelo



Forma do pavimento Nível +2,80

Figura 2- Planta de fôrma do nível +2,80 da Estrutura Modelo



#### 4 Aplicação do Método de Hirosawa adaptado

O Método de Hirosawa adaptado à realidade brasileira é aplicado à Estrutura Modelo considerando a variação das acelerações sísmicas das diferentes zonas sísmicas e as classes de terreno abordadas na NBR 15421 (ABNT, 2006).

A determinação dos índices de desempenho e sollicitação sísmica do Método de Hirosawa adaptado proposto por MIRANDA (2010) depende das propriedades físicas e geométricas da estrutura, das recomendações da NBR 15421 (ABNT, 2006) e de fatores específicos do próprio Método de Hirosawa original.

Na Estrutura Modelo, devido à ausência de pilares curtos (pilares de concreto armado cuja relação entre a altura livre ( $h_0$ ) e a base da seção ( $D$ ) é menor ou igual a 2 ( $h_0/D \leq 2$ )) e paredes de concreto armado, os pilares são os únicos elementos verticais considerados na determinação do subíndice de desempenho sísmico básico estrutural,  $E_0$ . Como todos os pilares possuem relação entre a altura livre dividida pela base da seção do pilar maior que 6,0 e a resistência do concreto à compressão é 20 MPa, o subíndice  $E_0$  é determinado pela Equação 3.

$$E_0 = \left\{ \left( \frac{n+1}{n+i} \right) \right\} \cdot a_1 \left[ \frac{f_c \cdot (\tau_{c2} \cdot A_{c2})}{20 \cdot W} \right] \cdot F_c \quad (\text{Equação 3})$$

Sendo,  $n$  o número de pavimentos;  $i$  o pavimento avaliado,  $a_1$  o fator de redução da capacidade resistente dos pilares de acordo com o deslocamento das paredes verificado no momento da ruptura das paredes;  $f_c$  a resistência do concreto à compressão;  $\tau_{c2}$  resistência média ao cisalhamento no estado limite último dos pilares cuja altura livre dividida pela base da seção do pilar é maior ou igual a 6,0;  $A_{c2}$  somatório das áreas de seção transversal dos pilares cuja altura livre dividida pela base da seção do pilar é maior ou igual a 6,0;  $W$  o peso da estrutura (calculado segundo a NBR 15421 (ABNT, 2006)) e  $F_c$  o índice de ductilidade dos pilares. As variáveis  $a_1$ ,  $\tau_{c2}$  e  $F_c$  do método de Hirosawa adaptado assumem os mesmos valores do método original e possuem valores 1,0; 0,7 MPa e 1,0 respectivamente.

Como a área da projeção da forma em “L” do pavimento é superior a 30% da área total do pavimento, o subíndice de configuração estrutural,  $S_D$ , assume o valor 0,8.

O subíndice de deterioração estrutural,  $T_D$ , atribuído à Estrutura Modelo é 0,9. Este valor cobre, de acordo com o Método de Hirosawa, as seguintes situações: edificação construída sobre aterro artificial, deformações visíveis em vigas ou pilares, fissuras inclinadas em pilares, fissuras nas paredes, infiltrações sem a presença de armaduras corroídas, edificações com mais de 20 anos e deterioração nos revestimentos de acabamentos.

A Tabela 1 resume as características e propriedades necessárias para o cálculo do índice de desempenho sísmico,  $I_s$ , da Estrutura Modelo.

Embora o índice de desempenho sísmico seja calculado para todos os pavimentos e seus valores apresentados nas tabelas e gráficos, somente o menor deles, destacado em vermelho na Tabela 1, é considerado na análise geral da vulnerabilidade sísmica da estrutura.

Tabela 1 – Índice de desempenho sísmico ( $I_s$ ) da Estrutura Modelo

	Pavimento 1	Pavimento 2	Pavimento 3
Nível da laje	+2,80m	+5,60m	+8,40m
Peso total acima do nível considerado ( $W$ ) em kgf	941.457,00	628.936,00	316.415,00
Área do pavimento em m <sup>2</sup>	454,66	454,66	454,66
Soma das seções dos pilares do pavimento ( $A_{c2}$ ) em cm <sup>2</sup>	36.660,00	36.660,00	36.660,00
Período da estrutura ( $T_a$ ) em segundos	0,32	0,32	0,32
Subíndice de desempenho sísmico básico estrutural ( $E_0$ )	0,17	0,20	0,34
Subíndice de configuração estrutural ( $S_D$ )	0,80	0,80	0,80
Subíndice de deterioração estrutural ( $T_D$ )	0,90	0,90	0,90
Índice de desempenho sísmico ( $I_s$ )	<b>0,12</b>	0,15	0,24

No método de Hirosawa adaptado, o subíndice de solicitação sísmica básica,  $E_s$ , assume o valor 0,83. Os valores do subíndice de sismicidade,  $Z$ , e do subíndice topográfico e geotécnico,  $G$ , são expostos na Tabela 2 e Tabela 3 respectivamente.

Tabela 2 – Subíndices de sismicidade do método de Hirosawa adaptado ao Brasil

Zona sísmica	Valores de $Z$
Zona 0	0,025
Zona 1	0,050
Zona 2	0,100
Zona 3 e 4	0,150

Tabela 3 – Subíndices topográfico e geotécnico do método de Hirosawa adaptado ao Brasil

Classe do terreno	$G$	
	$Z \leq 0,100$	$Z = 0,150$
<i>A</i>	0,8	0,8
<i>B</i>	1,0	1,0
<i>C</i>	1,2	1,2
<i>D</i>	1,6	1,5
<i>E</i>	2,5	2,1

Supondo a Estrutura Modelo ser de uso essencial, ou seja, categoria de utilização III, o subíndice de importância da edificação,  $U$ , assume, segundo a Tabela 4, o valor 1,5.

Tabela 4 – Subíndices de importância da edificação do método de Hirosawa adaptado ao Brasil

Categoria de utilização	$U$
I	1,00
II	1,25
III	1,50

Ainda segundo o método adaptado proposto por MIRANDA (2010), o índice de solicitação sísmica,  $I_{s0}$ , possui limite inferior,  $I_{s0,inf}$ , igual a 0,01 e limite superior,  $I_{s0,sup}$ , determinado pela Equação 4.

$$I_{s0,sup} = \frac{0,33 \cdot G_s \cdot Z \cdot U}{T_a} \quad (\text{Equação 4})$$

Sendo  $T_a$  o período natural aproximado da estrutura determinado pela NBR 15421 (ABNT, 2006) e os valores do subíndice  $G_s$  expostos na Tabela 5.

Tabela 5 – Subíndices  $G_s$  do método de Hirosawa adaptado ao Brasil

Classe do terreno	$G_s$	
	$Z \leq 0,100$	$Z = 0,150$
A	0,8	0,8
B	1,0	1,0
C	1,7	1,7
D	2,4	2,2
E	3,5	3,4

Os índices de solicitação sísmica são calculados e expostos na Tabela 6 supondo a estrutura estar localizada em qualquer uma das zonas sísmicas do território nacional e assentada sobre qualquer um dos terrenos classificados na NBR 15421 (ABNT, 2006). Os valores em vermelho correspondem aos índices de solicitação sísmica superiores ao índice de desempenho sísmico da Estrutura Modelo.

Tabela 6 – Índices de solicitação sísmica ( $I_{s0}$ ) da Estrutura Modelo

Zona sísmica	Classe do terreno				
	A	B	C	D	E
0	0,03	0,03	0,04	0,05	0,08
1	0,05	0,06	0,08	0,10	<b>0,16</b>
2	0,10	<b>0,13</b>	<b>0,15</b>	<b>0,20</b>	<b>0,31</b>
3 e 4	<b>0,15</b>	<b>0,19</b>	<b>0,23</b>	<b>0,28</b>	<b>0,39</b>

Da Figura 3 à Figura 6 são apresentados os gráficos comparativos do índice de desempenho sísmico,  $I_s$ , da Estrutura Modelo com os vários índices de solicitação sísmica,  $I_{s0}$ , para cada uma das combinações de zonas sísmicas e classes de terrenos brasileiras.

A aplicação dos métodos qualitativos de avaliação de vulnerabilidade sísmica, como o Método de Hirosawa adaptado, não permite identificar quais elementos verticais romperão inicialmente nem qual pavimento é o responsável pelo colapso total da estrutura. Estas informações que são de extrema importância no processo de reforço das estruturas, só podem ser obtidas através de métodos quantitativos e/ou experimentais. No entanto, é possível ter uma ideia do comportamento de cada pavimento individualmente através da análise dos gráficos a seguir.

A Estrutura Modelo construída em zona sísmica 0, independente da classe do terreno, não apresenta vulnerabilidade sísmica. Quando construída na zona sísmica 1, esta estrutura é vulnerável quando assentada em solo de classe E. O gráfico da Figura 4 indica que a incerteza quanto à segurança desta estrutura é consequência do comportamento do primeiro e segundo pavimentos. No caso de os comportamentos dos pavimentos serem confirmados através de métodos quantitativos de avaliação de vulnerabilidade sísmica, o reforço estrutural apenas do primeiro pavimento não seria suficiente para garantir a segurança sísmica da estrutura.

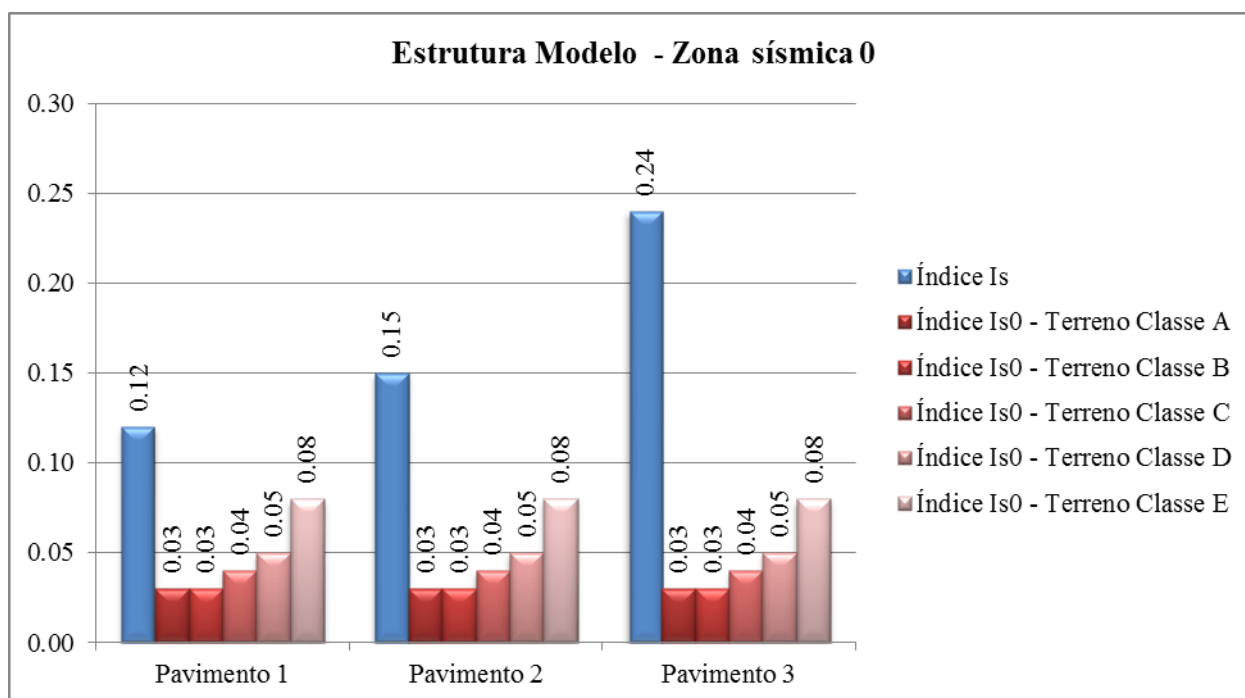


Figura 3 – Gráfico comparativo da Estrutura Modelo em zona sísmica 0



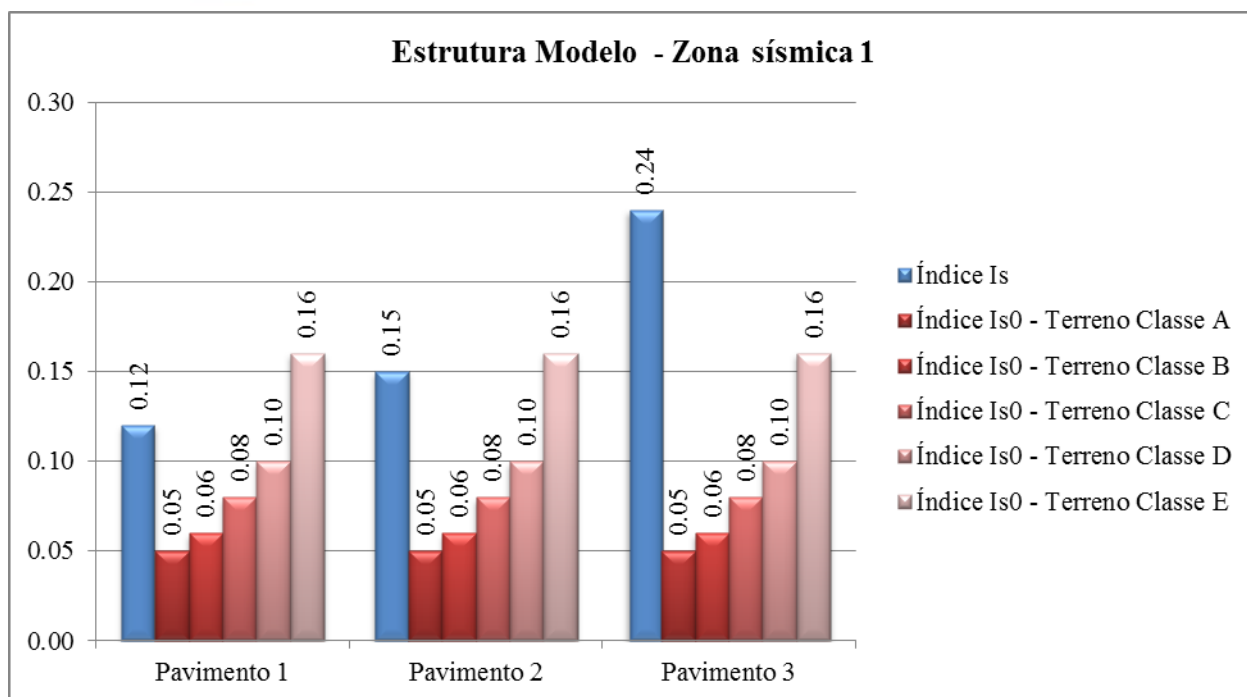


Figura 4 - Gráfico comparativo da Estrutura Modelo em zona sísmica 1

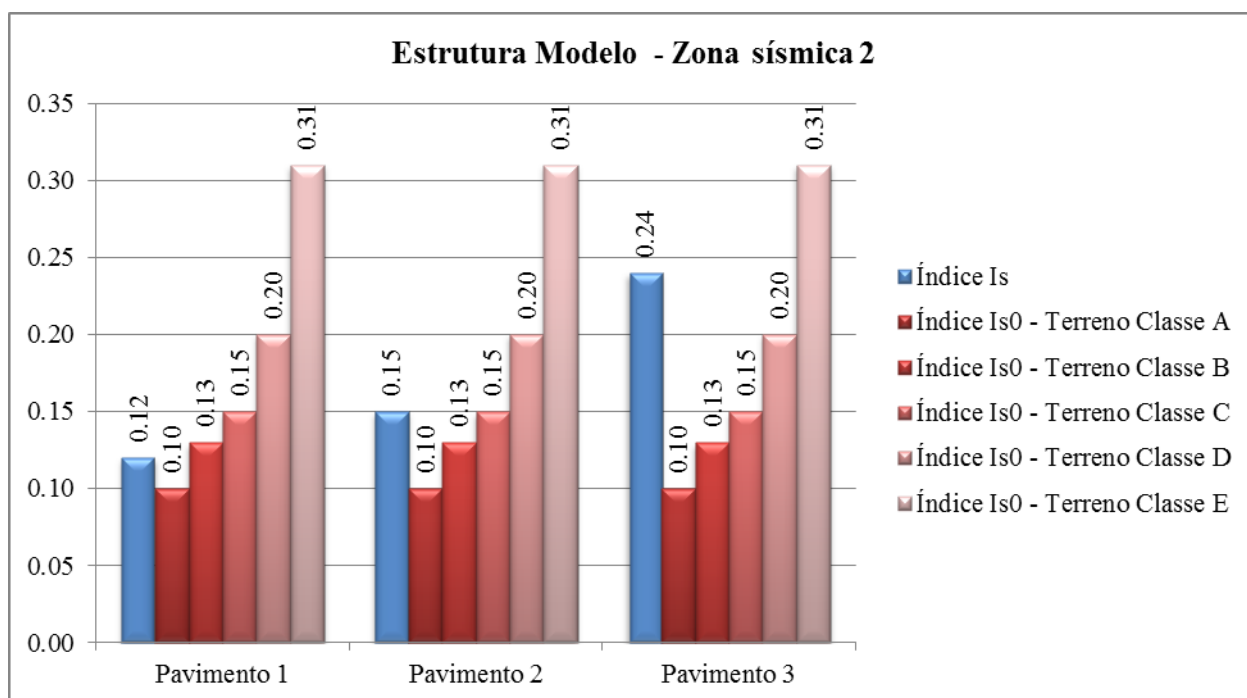


Figura 5 - Gráfico comparativo da Estrutura Modelo em zona sísmica 2

Construída na zona sísmica 2, a Estrutura Modelo apresenta vulnerabilidade sísmica quando assentada em terrenos de classe B, C, D e E. Nos terrenos de classe B e C, a incerteza quanto à segurança da estrutura é consequência do comportamento do primeiro pavimento. No terreno de classe D, a incerteza quanto à segurança da estrutura é consequência do comportamento do primeiro e segundo pavimentos. No terreno de classe E, a incerteza do comportamento está presente em todos os pavimentos, ou seja, caso fosse confirmada a vulnerabilidade sísmica da estrutura através da aplicação de métodos quantitativos, todos os pavimentos necessitariam de reforço estrutural.

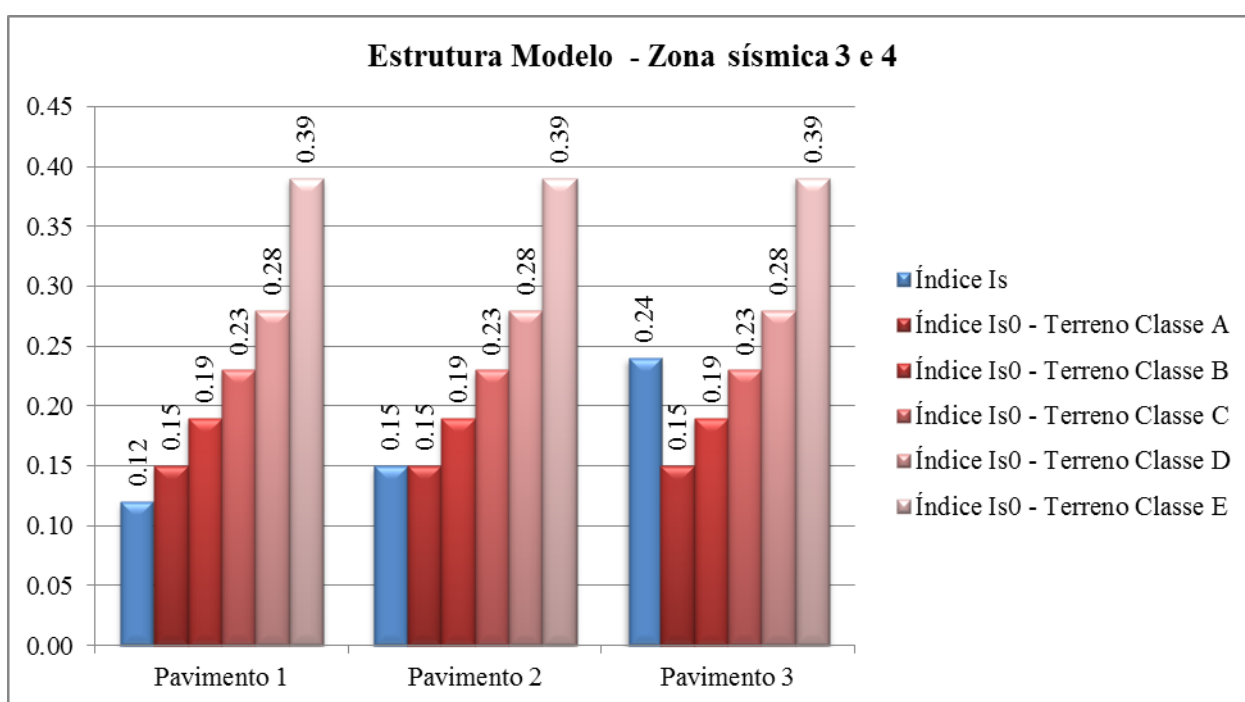


Figura 6 - Gráfico comparativo da Estrutura Modelo em zonas sísmicas 3 e 4

Quando construída nas zonas sísmicas 3 e 4, a Estrutura Modelo apresenta vulnerabilidade sísmica em todas as classes de terrenos. No terreno de classe A, a incerteza quanto à segurança da estrutura é consequência do comportamento apenas do primeiro pavimento, ou seja, caso fosse confirmada a vulnerabilidade sísmica da estrutura através da aplicação de métodos quantitativos, somente o primeiro pavimento necessitaria de reforço estrutural. Nos terrenos de classes B e C, a incerteza quanto à segurança da estrutura é consequência do comportamento do primeiro e segundo pavimentos. Nos terrenos de classe D e E, a incerteza do comportamento está presente em todos os pavimentos.

## 5 Conclusão

A aplicação do método de Hirosawa adaptado na Estrutura Modelo permitiu identificar em que situações esta é considerada vulnerável quando submetida às diversas acelerações de projeto e classes de terreno abordadas na NBR 15421 (ABNT, 2006).



A análise dos resultados apresentados leva a duas conclusões importantes. A primeira é que, como recomenda a NBR 15421 (ABNT, 2006), na zona sísmica 0 nenhum requisito de resistência antissísmica é exigido; fato constatado uma vez que a estrutura analisada não apresentou vulnerabilidade sísmica nesta zona. A segunda é que em terrenos de classe E, a estrutura analisada apresentou vulnerabilidade sísmica nas zonas 1, 2, 3 e 4, levando à necessidade de avaliações mais detalhadas e confirmando a grande capacidade de amplificação das acelerações sísmicas nas argilas moles como exposto na NBR 15421 (ABNT, 2006).

A constatação da vulnerabilidade sísmica de uma edificação pelo método de Hirosawa adaptado não implica na necessidade de demolição ou desativação da mesma, mas sim, na necessidade de análises mais detalhadas e complexas do comportamento esperado destas, frente a um evento sísmico. Estas análises, específicas e individuais para cada estrutura, poderão identificar a presença de elementos estruturais incompatíveis com o carregamento sísmico, levando ao diagnóstico de reforço estrutural para a continuidade de operação e funcionamento da edificação.

## 6 Referências

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15421: projetos de estruturas resistentes a sismos: procedimento**: Rio de Janeiro, 2006.

BERNARDINI, A. “**La Vulnerabilità Degli Edifici: Valutazione a Scala Nazionale Della Vulnerabilità Sismica Degli Edifici Ordinari**”, Research Report, CNR-Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti, Rome, Italy. 2000.

CALVI, G.M. “**A Displacement-Based Approach for Vulnerability Evaluation of Classes of Buildings**”, Journal of Earthquake Engineering, Vol. 3, No. 3, pp. 411-438. 1999.

HIROSAWA, M. **Retrofitting and Restoration of Buildings in Japan**. International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, Lecture Note of Seminar Course, 1992.

LANTADA, N., et al. “**Risk Scenarios for Barcelona, Spain**”, Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada, Paper No. 423. 2004.

MIRANDA, P. S. T. **Avaliação da Vulnerabilidade Sísmica na Realidade Predial Brasileira**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza. 2010.

MIRANDA, P. S. T.; ARAÚJO, T. D. P. **Aplicação do Método de Hirosawa Adaptado à Realidade Brasileira em uma Estrutura com um Grau de Liberdade**. Anais do 53º Congresso Brasileiro de Concreto – CBC2011. Florianópolis, Santa Catarina, pp. 1-9. 2011.



Anais do 55º Congresso Brasileiro do Concreto  
CBC2013  
Outubro / 2013



@ 2013 - IBRACON - ISSN 2175-8182

ROSSETO, T.; ELNASHAI, A. “**Derivation of Vulnerability Functions for European-Type RC Structures Based on Observational Data**”, Engineering Structures, Vol. 25, No. 10, pp. 1241-1263. 2003.